Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 36, 4, 2024. (35-56)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Fixed-time Fault Tolerant Control Based on Neural Network and Adaptive Sliding Mode Controller of Autonomous Underwater Vehicle with Actuator Saturation

Research Article

Majid Mokhtari[1], Mostafa Taghizadeh[2], Mahmood Mazare[3]

https://doi.org/10.22067/jacsm.2024.85527.1219

Abstract *The complexity of the sea environment, external disturbances and uncertainties in the system, as well as the failure and saturation of the actuators, are effective factors in the control of underwater vehicles. In this note, to deal with the mentioned problems, a robust and adaptive controller is proposed by combining the fast terminal dynamic sliding mode controller and the radial basis neural network. In the proposed approach, the problem of actuator saturation is considered and its stability is proved using Lyapunov theory. Fix-time convergence, estimation and dealing with external disturbances and uncertainties, active dealing with actuator fault, elimination of chattering phenomenon, and non-saturation of the actuator are the advantages of the proposed controller. The designed controller is applied on an autonomous underwater vehicle and the controller parameters are optimized to achieve the least error in tracking the reference trajectories as well as the shortest convergence time. To evaluate the performance of the proposed controller, it has been compared with a passive fault control method and PID controller, which has shown the superiority of the proposed control method in tracking the desired trajectories, the amount of control effort, dealing with actuators faults and external disturbances, as well as convergence in less time.*

Keywords Autonomous underwater vehicle, Adaptive dynamic fast terminal sliding mode controller, neural network, Fault tolerant control, Actuator saturation.

1. Introduction

The complexity of the sea environment, external disturbances, system uncertainties, and actuator failures or saturation pose significant challenges for the control of autonomous underwater vehicles (AUVs) [1]. To address these issues, this study proposes a robust and adaptive controller that combines a fast terminal dynamic sliding mode controller with a radial basis neural network. The proposed approach considers actuator saturation and proves stability using Lyapunov theory. It offers several advantages, including fixed-time convergence, estimation and handling of external disturbances and uncertainties, active handling of actuator faults, elimination of chattering phenomenon, and prevention of actuator saturation. The controller is applied to an AUV, with optimized parameters to minimize tracking error of reference trajectories and achieve the shortest convergence time. Performance evaluation against a passive fault control method and PID controller demonstrates the superiority of the proposed controller in accurately tracking desired trajectories, reducing control effort, handling actuator faults and external disturbances, and achieving faster convergence. Overall, the proposed robust adaptive controller effectively addresses key challenges faced in AUV control by synergistically combining sliding mode and neural network techniques.

2. Dynamic model of AUV

The dynamic model of the AUV in the earth-fixed frame is helpful for reasons such as remaining the buoyancy and gravitational vectors constant and presenting the trajectory in the inertia frame. An inertial representation of the AUV dynamics can be written as:

$$M(\eta)\ddot{\eta} + C(\nu,\eta)\dot{\eta} + D(\nu,\eta)\dot{\eta} + G(\eta) + \tau_d^* = P\tau_\eta + \bar{\tau}_\eta \quad (1)$$

Where $M(\eta) = J^{-T}MJ^{-1}$, $C(\nu,\eta) = J^{-T}(C(\nu) - MJ^{-1}\dot{J})J^{-1}$, $D(\nu,\eta) = J^{-T}D(\nu)J^{-1}$ and $G(\eta) = J^{-T}g(\eta)$, $\tau_d^* = J^{-T}\tau_d$ while J is the Jacobean matrix, and $M_{6\times6}$, $C(\nu)_{6\times6}$, $D(\nu)_{6\times6}$ and $g(\eta)_{6\times1}$ represent mass matrix which consists of the rigid body and added mass terms, the Coriolis and centrifugal matrix, the hydrodynamic damping matrix, and the restoring forces and moments due

*Manuscript received: November 27, 2023. Revised, April 20, 2024, Accepted, June 16, 2024.

[1] Ph.D, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

[2] Corresponding Author: Associate Professor, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. **Email**: Mo_taghizadeh@sbu.ac.ir

[3] Ph.D, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

to buoyancy and gravity, respectively. In addition, τ_η is the generalized forces/moment vector in the global-fixed frame, P represents the effectiveness matrix of τ_η and $\bar{\tau}_\eta$ is the unexpected bias faults.

In this study, each thruster has rotational capability, so it corresponds to two thrusters. Since $f = B[F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z]$ where F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, and M_z represent the forces and moments along the surge, sway, heave, roll, pitch, and yaw directions, respectively while f denotes the thruster forces. If one thruster experiences a physical failure, it becomes non-operational, and its vertical and horizontal force components are reduced to zero. To address this situation, the elimination of the column method is used, where the motion control equations are separated into horizontal and vertical modes. The projection matrix '[B]' is divided into two parts: the Horizontal Thrust Dynamics Matrix (HTDM) and the Vertical Thrust Dynamics Matrix (VTDM).

3. Controller design

This section is dedicated to the design of the controller. To design the fixed-time sliding mode-based neural network controller, a base sliding surface (BSS) is defined as follows:

$$\begin{aligned} s &= \dot{e} + \alpha e + \beta |e|^\gamma sgn(e) \\ e &= \eta_d - \eta \end{aligned} \quad (2)$$

Where , β, and γ are positive constants. To enhance the performance of the closed-loop system and establish a hierarchical sliding surface, a dynamic sliding surface is incorporated by introducing an additional dynamic variable. This not only helps mitigate chattering associated with conventional Sliding Mode Control (SMC) but also enhances tracking precision. Specifically, the dynamic second-order sliding surface (DSOSS) is defined as:

$$\vartheta = s + k_2 \int_0^t s(\tau) d\tau \quad (3)$$

Here, $k_2 > 0$. Next, the developed control law can be expressed as:

$$\begin{aligned} \tau_a &= C(v)v + D(v)v + g(\eta) - \hat{F}(Z) + M\ddot{q}_d + \lambda\alpha e \\ &\quad -M((\gamma\beta|e|^{\gamma-1} + \lambda + \alpha)\dot{e} + \lambda\beta|e|^\gamma sgn(e)) \\ &\quad -\frac{\sigma}{\|\sigma\|}\left(\tilde{p}\tanh\left(\frac{\tilde{p}}{l}\right) + 0.2785l\right) \\ &\quad -\frac{k_{12}}{2}\frac{\sigma}{\|\sigma\|^2}\sqrt{\sigma^T\sigma} - \frac{k_{22}}{2}\sigma\sigma^T\sigma \\ \tau_b &= -\frac{\|\tau_a\|\sigma}{\|\sigma\|(1-\Omega_{\max}(\Lambda))} \\ \tau &= \tau_a + \tau_b \\ \hat{F}(Z) &= \widehat{w}^T E_i(Z) + \varepsilon_i \\ \tilde{p} &= \hat{F} - F \end{aligned} \quad (4)$$

To guard against actuator faults, external disturbances, and model uncertainties the following adaptation law using radial-basis neural network is designed:

$$\dot{\widehat{w}} = Q(\|\sigma\| - P\widehat{w}^T\widehat{w}) \quad (5)$$

Where Q and P are positive coefficients.

Lemma 1: For any bounded initial state $x(0)$, if there exists a continuous and positive-definite Lyapunov function $V(x)$, satisfying $\dot{V}(x) \le -(\alpha V^c(x) + \beta V^g(x))^k + \eta$ where α, β, c, q and k are positive constants, $ck < 1$ and $qk > 1$, then, the equilibrium point of the system $\dot{x}_n(t) = f(x,t), x(0) = x_0$ is fixed-time stable. The convergence time are expressed as $T \le \frac{1}{\alpha^k\chi^k(1-ck)} + \frac{1}{\beta^k\chi^k(qk-1)}$ where $0 < \chi < 1$.

Theorem. Considering the dynamic model of the AUV (1), the proposed control law in (4) and (5), fixed-time trajectory tracking can be guaranteed by choosing appropriate parameters and the convergence time is derived as:

$$T \le T_{max} = \frac{1}{\frac{k_{12}}{2M}\left(\frac{1}{2} - 1\right)} + \frac{1}{\Xi\frac{k_{22}}{2M}(2-1)} \quad (6)$$

Where $0 < \Xi < 1$, k_{12} and k_{22} are positive and constance.

Proof: To show the stability of the closed-loop system, the following Lyapunov function can be defined:

$$V = \frac{1}{2}\sigma^T M\sigma + \frac{1}{2Q}\widetilde{w}^2 \quad (7)$$

Differentiating eq. (7) with respect to time yields,

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sigma^T M(M^{-1}\begin{pmatrix} -C(v)v - D(v)v - g(\eta) \\ +(\tau_a + \tau_b)(1-\Lambda) + F(Z) \end{pmatrix} \\ &\quad - \ddot{q}_d + (\gamma\beta|e|^{\gamma-1} + \lambda + \alpha)\dot{e} + \lambda\alpha e \\ &\quad + \lambda\beta|e|^\gamma sgn(e)) + \frac{1}{Q}\widetilde{w}\dot{\widehat{w}} \end{aligned} \quad (8)$$

Thus, through mathematical simplification and using Lemma 1, we can conclude that the fixed convergence time is as stated in the (6).

Remark 1: It is important to acknowledge that while the maximum settling time of a system controlled by fixed-time SMC is not affected by the initial states, establishing a direct relationship between the settling time and system parameters can be difficult. In certain situations, it may not be possible to reduce the settling time below a certain fixed constant, even by adjusting the system parameters.

4. Numerical Results and Discussions

To validate the effectiveness of the proposed control framework, two experimental cases are conducted on an underwater vehicle and compared against two controllers from previous literature [2]. A 20% model inaccuracy is introduced to account for uncertainties in the AUV dynamics. The simulation results, showcased in Fig. 1 for one state of the AUV system, clearly demonstrate that the proposed controller outperforms the other methods in mitigating the effects of actuator faults, external disturbances, and model uncertainties. The proposed approach exhibits superior compensation capabilities, enabling more accurate and robust trajectory tracking

performance under faulty actuator conditions and in the presence of disturbances and uncertainties in the vehicle model.

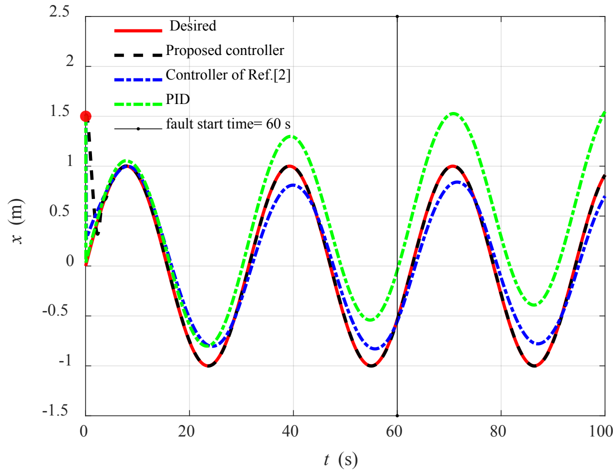


Figure 1. Trajectory tracking of x position

To comprehensively evaluate the robustness and control effectiveness of the proposed algorithm under varying uncertainty conditions, a bar chart is presented depicting the root-mean-square (RMS) of the tracking error. This bar chart provides a clear visual overview comparing the tracking performance of the proposed controller across different percentages of system uncertainty.

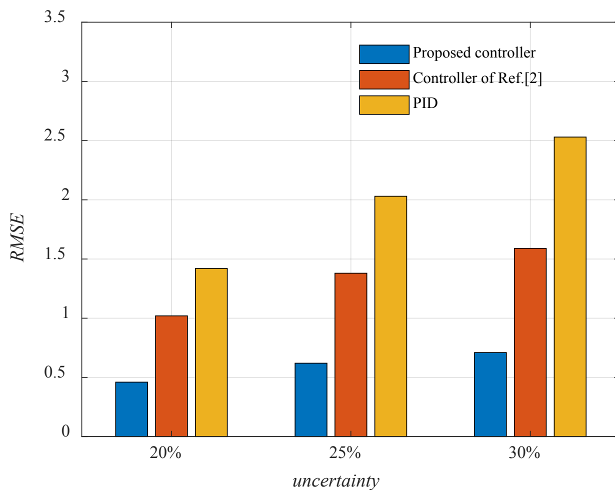


Figure 2. RMS evaluation for designed controllers

5. Conclusion

This paper proposes a novel fixed-time fault tolerant control strategy for autonomous underwater vehicles (AUVs) by integrating radial basis function neural networks and dynamic sliding mode control. The approach provides reliability and robustness against actuator failures, external disturbances, and uncertainties. Simulation results demonstrate the proposed controller's effectiveness in ensuring stable trajectory tracking performance despite system faults and disturbances.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک،۳۶، ۴، ۱۴۰۳. (۵۶-۳۵)



علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir



کنترل تحمل‌پذیر عیب زمان ثابت مبتنی بر شبکه عصبی و کنترل کننده تطبیقی مد لغزشی یک وسیله نقلیه زیردریایی با اشباع عملگر*

مقاله پژوهشی

مجید مختاری(۱) مصطفی تقی‌زاده(۲) محمود مزارع(۳)

https://doi.org/10.22067/jacsm.2024.85527.1219

چکیده *پیچیدگی محیط دریا، اغتشاشات خارجی و عدم قطعیت‌های وارد بر سیستم وسیله نقلیه زیرآبی و همچنین عیب و اشباع عملگر از عوامل مؤثر در کنترل این نوع از وسایل نقلیه می‌باشد. در این مقاله به منظور مقابله با مشکلات مذکور، یک کنترل‌کننده مقاوم و تطبیقی با ترکیب کنترل کننده مد لغزشی دینامیکی سریع ترمینالی و روش شبکه عصبی با تابع پایه شعاعی پیشنهاد jmn شده است. در الگوریتم کنترلی پیشنهادی، مسئله اشباع عملگر در نظر گرفته شده و پایداری آن به کمک تئوری لیاپانوف اثبات شده است. از قابلیت‌های کنترل کننده پیشنهادی هم‌گرایی زمان ثابت، تخمین و مقابله با اغتشاش و عدم قطعیت سیستم، مقابله فعال با عیب عملگر، حذف پدیده چترینگ و عدم اشباع عملگر می‌باشد. کنترل کننده طراحی شده بر روی یک وسیله نقلیه زیرآبی مستقل اعمال شده و پارامترهای کنترل کننده برای دستیابی به کمترین خطا در تعقیب مسیرهای مرجع و کمترین زمان هم‌گرایی به کمک روش جستجوی هارمونی بهینه‌سازی شده‌اند. به منظور بررسی بهتر، عملکرد کنترل کننده پیشنهادی با یک روش کنترل عیب غیرفعال و روش PID مقایسه شده است که نتایج برتری روش کنترلی پیشنهادی را در تعقیب مسیرهای مرجع، میزان تلاش کنترلی، مقابله با عیب عملگر و اغتشاشات خارجی و همچنین هم‌گرایی در زمان کمتر به مقادیر مطلوب نشان داده است.*

واژه‌های کلیدی وسیله نقلیه زیر آبی، کنترل کننده تطبیقی مد لغزشی دینامیکی سریع ترمینالی، شبکه عصبی، کنترل فعال عیب عملگر، اشباع عملگر.

مقدمه

محیط زیر آب، همواره دینامیکی پیچیده با نامعینی بالا داشته که این پیچیدگی‌ها سبب سختی در انجام فعالیت‌های زیر آب در مقایسه با خشکی می‌شوند و این موضوع در فعالیت‌هایی که نیاز به دقت بالا دارند، بیشتر قابل ملاحظه است. فعالیت‌هایی نظیر وصل کردن اتصالات، عملیات روی شیرها، عملیات حفاری و جوشکاری نیاز به دقت سانتی‌متر یا کمتر دارند و این در حالی است که دقت موقعیت وسیله نقلیه زیرآبی به دست آمده با به‌کارگیری سنسورهای مختلف عموما کمتر از این مقدار است [1]. استفاده از روش‌های کنترل مقاوم با قابلیت مقابله با اغتشاشات، عدم قطعیت‌ها و عیوب احتمالی در بهبود اجرای عملیات‌های پیچیده زیر آبی مؤثر است. از سوی دیگر از کار افتادن پیشران‌ها از مهم‌ترین عدم قطعیت‌های این سیستم‌های زیر آبی است. این سیستم‌ها باید مجهز به مکانیزم کارآمد تشخیص و مقابله با عیب باشد تا از گم شدن و از دست رفتن آنها جلوگیری شود [2].

کنترل تحمل‌پذیر عیب عملگر در وسایل نقلیه زیر آبی به روش‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. روش‌های ارائه شده شامل سه مرحله می‌باشد: شناسایی عیب، جداسازی عیب و تطبیق عیب. دو بخش اول بر شناسایی علل بالقوه عیب و حذف آنها متمرکز است. طرح‌های تشخیص عیب معمولا مبتنی بر مدل هستند [3]. روش‌های تشخیص و جداسازی عیب

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۹/۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۳/۲۷ می‌باشد.

(۱) دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

(۲) نویسنده مسئول، دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

(۳) دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

Email: Mo_taghizadeh@sbu.ac.ir

مبتنی بر سنسور نیز در برخی منابع ارائه شده است [4]. مرحله سوم شامل تطبیق عیب است که بر اساس هندسه، مکان و تعداد پیشرانه‌ها، میزان افزونگی سیستم و معماری کنترل وسیله نقلیه زیر آبی است. در صورت وقوع عیب در سیستم، این عوامل یک مسیر جایگزین که معمولا شامل تغییر در استراتژی کنترل است را ارائه می‌دهند [5].

به منظور مقابله با عیب سیستم دو نوع استراتژی کنترل تحمل‌پذیر عیب فعال و کنترل تحمل عیب غیر فعال در منابع مختلف ارائه شده است [6,7]. در کنترل فعال عیب، کنترل‌کننده اثر عیوب عملگرها را با قانون کنترل مناسب جبران می‌کند [7,8]. روش‌های مختلفی برای مقابله با عیب وسایل نقلیه زیرآبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که روش شبه معکوس وزنی و روش حذف ستون از مهم‌ترین این روش‌ها هستند [2]. این روش‌ها بیشتر برای حالتی که یک عملگر به طور مطلق از کار می‌افتد، به‌کارگیری شده‌اند. اولین مطالعه در این زمینه توسط کانتی پودر (Kanti Podder) انجام شد [9]. روش آنها بر اساس شکست مطلق رانشگرها بود که بعدا برای عیب جزئی توسعه یافت [10].

در کنترل تحمل‌پذیر عیب از نوع غیر فعال، تکنیک‌های کنترل مقاوم عملکرد مناسب سیستم در مقابله با عیب را تضمین می‌کنند. این روش‌ها معمولا در زمانی مناسب است که یک مدل دینامیکی دقیق از سیستم که به پیچیدگی دینامیک سیستم بستگی دارد در دسترس باشد [11]. در وسایل نقلیه زیردریایی عموما از روش غیر فعال تحمل‌پذیر عیب جهت کاهش پیچیدگی‌های روش کنترلی برای مقابله با عیب جزئی عملگرها استفاده شده است [12]. از منظر ساختار کنترل، روش‌های غیرفعال تحمل‌پذیر دارای سادگی و پیچیدگی محاسباتی کمتری نسبت به روش فعال هستند [13].

به منظور مقابله با اغتشاشات و عدم قطعیت‌های سیستم و همچنین کنترل عیوب عملگر و سنسور، روش‌های متعددی پیشنهاد شده است، مانند کنترل تطبیقی [2]، کنترل پیش‌بین [14]، کنترل بهینه [15]، کنترل مقاوم [16,17]، روش‌های یادگیری تقویتی [18]، کنترل فازی [19]، کنترل مد لغزشی [13,20] و کنترل مبتنی بر شبکه عصبی [21].

در مقایسه با سایر روش‌ها، روش‌های مبتنی بر کنترل مد لغزشی مانند کنترل مد لغزشی فراپیچشی [22]، کنترل مد لغزشی مرتبه بالای فراپیچشی [23] و کنترل مد لغزشی انتگرالی سریع [24] دارای ویژگی‌های برجسته‌ای مانند مقاومت بالا در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت‌های سیستم، کاهش پدیده چترینگ در سیگنال کنترلی و هم‌گرایی زمان محدود به مقدار مطلوب می‌باشند [23,24].

از مهم‌ترین مشکلات کنترل‌کننده‌های با هم‌گرایی زمان محدود، وابستگی زمان هم‌گرایی به شرایط اولیه سیستم می‌باشد [16]. به منظور مقابله با این مشکل، کنترل‌کننده‌های زمان ثابت ارائه شده است. در این نوع کنترل‌کننده‌ها زمان هم‌گرایی متغیرهای حالت در یک محدوده قرار می‌گیرد که حد بالای آن مستقل از شرایط اولیه سیستم است [25,26]. در این راستا کنترل‌کننده مد لغزشی غیر تکین انتگرالی سریع برای کنترل تعقیب سیستم‌های چند عامله مورد استفاده قرار گرفته است[27] . همچنین در برخی از منابع روش‌های کنترل زمان ثابت مبتنی بر کنترل مد لغزشی برای سیستم‌های رباتیک با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامتری و اشباع سیگنال ورودی ارائه شده که در آن به کمک شبکه عصبی عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات سیستم تعیین شده است [16,21].

از مهم‌ترین محدودیت‌های روش‌های کنترل زمان ثابت مشخص بودن پارامترهای دینامیکی سیستم است که این موضوع در کاربردهای عملی غیر ممکن است. روش‌های مبتنی بر شبکه عصبی به طور گسترده برای مقابله با عدم قطعیت‌ها و غیرخطی‌های مدل سیستم استفاده شده است [21]. علاوه بر این، مسئله اشباع ورودی در سیستم‌های رباتیک واقعی نیز باید مورد توجه قرار گیرد [16,28].

در این مقاله، در ابتدا روش کنترل زمان ثابت مد لغزشی دینامیکی سریع ترمینالی مبتنی بر شبکه عصبی ارائه شده و پایداری آن به کمک روش لیاپانوف اثبات شده است. در روش کنترل مد لغزشی دینامیکی با افزودن یک دینامیک اضافی در سطح لغزش نه تنها پدیده چترینگ کاهش می‌یابد بلکه دینامیک حالت لغزشی، پاسخ حلقه بسته سیستم و میزان مقاوم بودن کنترل‌کننده بهبود خواهد یافت [8]. روش کنترلی پیشنهادی روی وسیله نقلیه زیر آبی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، اغتشاشات خارجی، عیب جزئی عملگر و اشباع سیگنال ورودی اعمال شده است. در نهایت نتایج روش کنترلی پیشنهادی با روش کنترل ارائه شده در مرجع [2] و روش PID مقایسه شده است. همچنین به منظور دستیابی به کمترین خطا در تعقیب مسیرهای مطلوب،

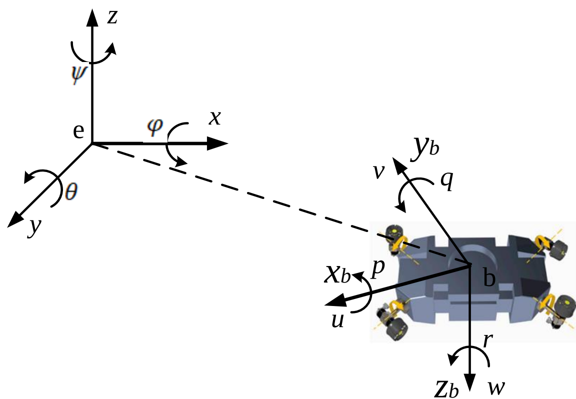
کمینه‌سازی سیگنال کنترلی و کاهش زمان هم‌گرایی به مقدار مطلوب، به کمک الگوریتم جستجوی هارمونی، پارامترهای کنترل‌کننده‌ها تعیین شده‌اند [29]. نوآوری این مقاله عبارتست از: ۱) ارائه روش کنترل زمان ثابت مد لغزشی دینامیکی سریع ترمینالی مبتنی بر شبکه عصبی، ۲) اعمال کنترل‌کننده پیشنهادی روی وسیله نقلیه زیرآبی و ۳) در نظر گرفتن هم‌زمان مسئله عیب عملگر و اشباع ورودی.

ساختار این مقاله بدین ترتیب است: در ابتدا وسیله نقلیه زیرآبی مورد نظر معرفی شده، معادلات دینامیکی و همچنین روابط حاکم بر عملگرهای سیستم آورده شده است. در ادامه روش کنترلی پیشنهادی و پایداری آن بررسی شده است. در سپس شبیه‌سازی‌ها انجام شده و نتایج کنترل‌کننده‌های طراحی شده ذکر شده‌اند. در آخر نتیجه‌گیری از این پژوهش در بیان شده است.

معرفی و مدل‌سازی وسیله نقلیه زیرآبی

مدل وسیله نقلیه زیرآبی مورد مطالعه در این پژوهش، یک سیستم مستطیل شکل با چهار پیشرانه است که حول یک محور مورب نسبت به بدنه می‌چرخد. این پیشرانه‌ها می‌توانند حول محورهای خود به صورت مستقل بچرخند و امکان حرکت در شش درجه آزادی را فراهم سازند [2]. مدل این وسیله زیرآبی با قابلیت ردگیری دقیق اجسام متحرک زیر دریا در شکل (۱) ارائه شده است.

مدل ارائه شده به دلیل چرخش رانشگرها، یک مدل دینامیکی دارای کوپل غیرخطی بوده که نیاز به طراحی سیستم کنترل پیچیده در مقایسه با یک سیستم با رانشگر ثابت دارد[30] . مدل فعلی بیش‌فعال با هشت ورودی برای دستیابی به خروجی کنترل مورد نیاز است. رانشگرها چهار ورودی را به شکل نیروی رانش فراهم می‌کنند و چهار ورودی دیگر توسط سروو موتورها بر اثر حرکت دادن هر رانشگر تأمین می‌شود. چهار پیشران رانشگرها در زاویه ۴۵ درجه نسبت به صفحه x_bz_b قرار می‌گیرند. تجزیه و تحلیل حرکت وسیله نقلیه زیر آبی نیاز به تعریف دو چارچوب مرجع مختصات دارد. یک دستگاه مختصات ثابت بدنی (b) یا دستگاه مرجع مختصات متحرک که به مرکز ثقل وسیله نقلیه متصل است و دیگری یک دستگاه مختصات اینرسی ثابت روی سطح زمین (e) می‌باشد. در شکل (۱)، z, y, x نشان‌دهنده موقعیت خطی در دستگاه اینرسی، ψ, θ, φ نشان‌دهنده موقعیت‌های زاویه‌ای در دستگاه اینرسی، w, v, u نشان‌دهنده سرعت‌های خطی در دستگاه بدنی و r, q, p نشان‌دهنده سرعت‌های زاویه‌ای در دستگاه بدنی می‌باشند. پارامترهای هندسی و فیزیکی مدل در جدول (۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱ شماتیک زیر دریایی مورد مطالعه [2]

جدول ۱ پارامترهای هندسی و فیزیکی مدل [31]

پارامتر	واحد	مقدار
ابعاد(طول، عرض، ارتفاع)	mm	۷۵۵، ۲۸۰، ۳۲۶
وزن	kg	۵۷/۱
چگالی	kg/m^3	۱۰۲۱
مختصات مرکز جرم در دستگاه بدنی	mm	(۰،۰،۰)
مختصات مرکز شناوری در دستگاه بدنی	mm	(۰،۰،۰)
ممان اینرسی $(I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}, I_{xy}, I_{yz}, I_{xz})$	kgm^2	(۰/۰۱۶- و ۰/۰۰۰۰۹- و ۰/۰۱۸- و ۴/۰۹۹ و ۳/۶۴۸ و ۱/۱۰۰)

به منظور استخراج معادلات دینامیکی حاکم بر حرکت زیردریایی فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

فرض ۱) عناصر خارج از قطر اصلی ماتریس اینرسی نادیده گرفته می‌شوند زیرا شکل وسیله نقلیه به صورت یک مکعب با سه صفحه تقارن در نظر گرفته شده است.

فرض ۲) وســیله نقلیه به طور طبیعی شــناور در نظر گرفته می‌شود و مرکز ثقل با مرکز شناوری منطبق است.

فرض ۳) شــتاب ناشــی از گرانش ثابت و برابر ۹/۸۱ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود.

برای استخراج معادلات دینامیک زیردریایی مختصات تعمیم یافته به صورت رابطه (۱) تعریف شده است که در آن بردار η مختصات تعمیم یافته در قاب زمین ثابت و ν بردارهای سرعت خطی و زاویه‌ای را در مختصات بدنی نشان می‌دهند.

$$\eta = [\eta_1^T\ \eta_2^T]^T,\quad \eta_1 = (x\ y\ z)^T \quad \eta_2 = (\varphi\ \theta\ \psi)^T$$
$$\nu = [\nu_1^T\ \nu_2^T]^T,\quad \nu_1 = (u\ v\ w)^T \quad \nu_2 = (p\ q\ r)^T$$

(۱)

در چارچوب مرجع ثابت روی زمین، بردار موقعیت η_1 نشــان‌دهنده موقعیت وســیله نقلیه در امتداد جهت‌های طولی، عرضی و عمودی است و η_2 مختصات زوایای اویلر را نشان می‌دهد. ν_1 سـرعت‌های خطی و ν_2 سـرعت‌های زاویه‌ای قاب وســیله نقلیه در دســتگاه مختصــات بدنی می‌باشــد. معادلات حرکت سیستم در دستگاه مختصات ثابت بدنه به کمک روش اویلر لاگرانژ در رابطه (۲) ارائه شده است [2].

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau + \tau_d + \tau_F \qquad (۲)$$

که در آن M ماتریس جرم ۶ × ۶ یا تانسور اینرسی وسیله نقلیه است که از بدنه صلب و جرم اضافه تشکیل شده است. C ماتریس کوریولیس و گریز از مرکز یک ماتریس ۶ × ۶ است و D ماتریس میرایی هیدرودینامیکی که یک ماتریس قطری ۶ × ۶ مثبت معین است. g بردار ۱ × ۶ است که نیروها و گشتاورهای بازگرداننده را نشان می‌دهد. نیروها و گشتاورهای تعمیم یافته روی سیستم در قاب بدنی با τ نشان داده شده‌اند [31]. τ_d گشتاور اغتشاشی است که در آن $\|\tau_d\| \le \tau_d^*$ می‌باشد و τ_F عیب عملگر می‌باشد. همچنین معادلات سینماتیکی زیردریایی در قاب اینرسی به صورت رابطه (۳) می‌باشد.

$$\dot{\eta} = J(\eta)\nu \qquad (۳)$$

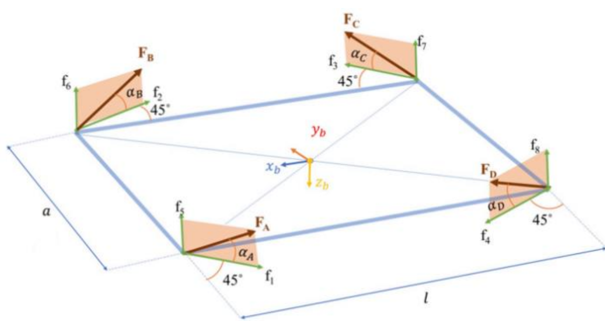
$J(\eta)$ ماتریس ژاکوبین اســت که ســرعت بیان شــده در قاب ثابت بدنه را به قاب ثابت روی زمین انتقال می‌دهد [32].

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi s\theta s\phi & 0 & 0 & 0 \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\phi + s\psi s\theta s\phi & 0 & 0 & 0 \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix}$$

$$c\theta = \cos\theta \quad s\theta = \sin\theta \quad t\theta = \tan\theta$$

(۴)

در مدل زیردریایی مورد مطالعه رانشگرها حول محوری در صفحه افقی که با زاویه ۴۵ درجه نسبت به صفحه $x_b z_b$ در قاب ثابت بدنه قراردارد، می‌چرخند. همان طور که در رابطه (۵) مشاهده می‌شود، نیروی رانش f با ماتریس B که هر دو در دستگاه ثابت بدنی بیان می‌شوند، به بردار نیروها و ممان‌های تعمیم‌یافته نگاشت می‌شوند. در شکل (۲) مؤلفه‌های نیروی رانشگرها نشان داده شده است. f بردار متشکل از هشت جزء نیروی رانش حاصل از چهار رانشگر A، B، C و D است که در آن f_1، f_2، f_3 و f_4 مؤلفه‌های افقی و f_5، f_6، f_7 و f_8 مؤلفه‌های عمودی هستند. نیروهای رانش F_A، F_B، F_C و F_D حاصل پیشرانه‌های A، B، C و D هستند. همچنین l طول زیردریایی و a عرض زیردریایی می‌باشد. بنابراین با تغییر در مقدار نیروی پیشرانه‌ها و تغییر زاویه آنها نسبت به صفحه $x_b z_b$، نیرو و گشتاور لازم برای حرکت زیردریایی در جهات مختلف فراهم خواهد شد.



شکل ۲ مؤلفه‌های نیروی رانشگرها [2]

$$\tau = [B]f$$
$$f = [f_1\ \ f_2\ f_3\ f_4\ f_5\ f_6\ f_7\ f_8]$$
$$\begin{aligned} f_1 &= F_A\cos(\alpha_A) & f_5 &= F_A\sin(\alpha_A) \\ f_2 &= F_B\cos(\alpha_B) & f_6 &= F_B\sin(\alpha_B) \\ f_3 &= F_C\cos(\alpha_C) & f_7 &= F_C\sin(\alpha_C) \\ f_4 &= F_D\cos(\alpha_D) & f_8 &= F_D\sin(\alpha_D) \end{aligned}$$

(۵)

ماتریس B با رابطه (۶) بیان شده است.

$$[B] = \begin{bmatrix} -1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a/2 & -a/2 & -a/2 & a/2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & l/2 & l/2 & -l/2 & -l/2 \\ -(l+a)/2\sqrt{2} & (l+a)/2\sqrt{2} & -(l+a)/2\sqrt{2} & (l+a)/2\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(۶)

همان طور که از رابطه (۵) و رابطه (۶) قابل مشاهده است، با ضرب ماتریس B در ماتریس f، ماتریس $\tau_{6\times1}$ حاصل می‌شود که هر یک از مؤلفه‌های آن نشان‌دهنده نیرو و یا گشتاور لازم برای حرکت دادن زیردریایی در جهات مختلف می‌باشد. به طور مثال برای حرکت زیر دریایی فقط در جهت عمودی لازم است زوایای α_A، α_B، α_C و α_D نود درجه بوده و مقدار نیروی پیشران‌ها برابر باشد و یا برای حرکت زیر دریایی فقط در جهت طولی لازم است زوایای α_A، α_B، α_C و α_D صفر درجه بوده و مقدار نیروهای رانش F_A و F_B با هم برابر و همچنین مقدار نیروهای رانش F_C و F_D نیز با هم برابر باشند.

به منظور در نظر گرفتن مسئله اشباع سیگنال کنترلی، تابع غیرخطی $U(\tau)$ به‌صورت رابطه (۷) تعریف شده است [21].

$$U(\tau) = \begin{cases} \mathrm{sign}(\tau)\, u_{max} & \text{if } \|\tau\| \geq u_{max} \\ \tau & \text{if } \|\tau\| \leq u_{max} \end{cases}$$
$$\|\Delta u\| = \|U(\tau) - \tau\| \leq u_{max}$$

(۷)

در رابطه (۷) u_{max} حد بالای ناحیه اشباع عملگر است و u_{max} یک ثابت مشخص است. برای مقابله مؤثر با مشکل اشباع، $U(\tau)$ را می‌توان با رابطه (۸) تقریب زد [16].

$$U(\tau) = L(\tau) + \Delta u = \frac{2u_{max}}{\pi}\arctan\left(\frac{\pi\tau}{2u_{max}}\right) + \Delta u$$
$$\|\Delta u\| \leq u_{max} - \frac{2u_{max}}{\pi}\arctan\left(\frac{\pi}{2}\right) = \bar{\Delta}$$

(۸)

مطابق با قضیه مقدار میانی داریم:

$$L(\tau) = L(\tau^0) + \left.\frac{\partial L(\tau)}{\partial \tau}\right|_{\tau=\tau^\mu} (\tau - \tau^0)$$
$$\tau^\mu = \tau\mu + (1-\mu)\tau^0$$

(۹)

که در آن μ مقداری مثبت بین صفر و یک است. با فرض $\tau^0 = 0$ رابطه (۱۰) حاصل شده است.

$$L(\tau) = \left.\frac{\partial L(\tau)}{\partial \tau}\right|_{\tau=\tau^\mu} \tau \qquad (۱۰)$$

با تعریف Λ به صورت رابطه (۱۱) داریم [16]:

$$\Lambda = \left(\frac{\pi\mu\tau}{2u_{max}}\right)^2 / \left(1 + \left(\frac{\pi\mu\tau}{2u_{max}}\right)^2\right)$$
$$L(\tau) = \tau - \tau\Lambda$$

(۱۱)

بنابراین رابطه (۲) به صورت رابطه (۱۲) باز نویسی می‌گردد.

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) = L(\tau) + F(Z)$$
$$F(Z) = \tau_d + \tau_F - \left(\Delta M\dot{\nu} + \Delta C(\nu)\nu + \Delta D(\nu)\nu + \Delta g(\eta)\right) + \Delta u$$

(۱۲)

کنترل کننده مد لغزشی دینامیکی سریع ترمینالی مبتنی بر شبکه عصبی

در این مقاله برای تخمین عیب، اغتشاشات و عدم قطعیت‌های سیستم از روش شبکه عصبی تابع پایه شعاعی استفاده شده است. معادلات حاکم بر این شبکه عصبی در رابطه (۱۳) ارائه شده است [33].

$$F(Z) = {w_i}^T E_i(Z) + \varepsilon_i\ ,\ w \in R^l$$
$$Z = [Z_{j۱}, Z_{j۲}, .., Z_{jq}]$$
$$E_j(Z) = \exp\left(\frac{-\|Z - \zeta_j\|^۲}{\nabla_j^۲}\right),\ j = 1,2,..,L$$
$$\zeta_j = [\zeta_{j۱}, \zeta_{j۲}, .., \zeta_{jq}]$$
$$\|\varepsilon\| \leq \varepsilon^*$$

(۱۳)

در رابطه (۱۳) Z ورودی شبکه عصبی است که خطای تعقیب می‌باشد، w تابع وزنی، L تعداد لایه‌های شبکه عصبی، q تعداد ورودی‌ها، ε خطای تخمین و ε^* یک ثابت مثبت است که حد بالای خطای تخمین را نشان می‌دهد. $E_j(Z)$ یک تابع گوسی می‌باشد که در آن ∇ عرض تابع و ζ مرکز تابع گوسی می‌باشد.

تعریف ۱) برای سیستم غیرخطی $\dot{x} = g(t, x)$ و $x(0) = x_0$ که در آن $x \in \mathbb{R}^n$ و $g: \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n$ می‌باشد، نقطه تعادل سیستم تعریف پایداری زمان ثابت را برآورده می‌کند اگر به صورت عمومی در زمان محدود پایدار بوده و زمان نشست آن $T(x_0)$ به طور یکنواخت محدود باشد یعنی برای هر $x \in \mathbb{R}^n$ $T(x_0) < T_{max}$ و $T_{max} > 0$ باشد [34].

لم ۱) فرض می‌شود تابع لیاپانوف انتخابی مانند $V(x)$ وجود دارد که در رابطه (۱۴) صدق می‌کند [34].

$$\dot{V}(x) < -pV^a(x) - qV^b(x) \quad (۱۴)$$

در رابطه (۱۴) p و q ثوابت مثبت، a بزرگ‌تر از یک و $0 < b < 1$ می‌باشد. در این صورت می‌توان نتیجه گرفت که سیستم در یک زمان ثابت به مقادیر مطلوب هم‌گرا است و زمان هم‌گرایی T در رابطه (۱۵) صدق می‌کند.

$$T \le T_{max} = \frac{1}{p(a-1)} + \frac{1}{q(b-1)} \quad (۱۵)$$

لم ۲) فرض می‌شود تابع لیاپانوف انتخابی مانند $V(x)$ وجود دارد که در رابطه (۱۶) صدق می‌کند [35].

$$\dot{V}(x) < -pV^a(x) - qV^b(x) + \Upsilon \quad (۱۶)$$

در رابطه (۱۶) p و q ثوابت مثبت، a بزرگ‌تر از یک، $0 < b < 1$ و ϒ مقدار ثابت می‌باشد. در این صورت می‌توان نتیجه گرفت که سیستم در یک زمان ثابت به مقادیر مطلوب هم‌گرا است و زمان هم‌گرایی T در رابطه (۱۷) صدق می‌کند.

$$T \le T_{max} = \frac{1}{p\Xi(a-1)} + \frac{1}{q\Xi(b-1)}, 0 < \Xi < 1$$

$$\breve{R} = \left\{ X \,\middle|\, V(X) \le \min\left\{ \left[\frac{\Upsilon}{p(1-\Xi)}\right]^{\frac{1}{a}}, \left[\frac{\Upsilon}{q(1-\Xi)}\right]^{\frac{1}{b}} \right\} \right\}$$

(۱۷)

در رابطه (۱۷) $\breve{R}$ مجموعه باقی‌مانده پاسخ‌های سیستم را به‌ازای پارامترهای X در زمان T_{max} را نشان می‌دهد.

لم ۳) برای هر $0 < l$ و برای هر عدد حقیقی Γ می‌توان نوشت [28]:

$$0 \le |\Gamma| - |\Gamma|\tanh\left(\frac{|\Gamma|}{l}\right) \le 0.2785l \quad (۱۸)$$

در این مقاله برای بهبود مقاومت کنترل‌کننده مد لغزشی، بالا بردن سرعت هم‌گرایی و همچنین حذف پدیده چترینگ، از کنترل‌کننده تطبیقی مد لغزشی دینامیکی مبتنی بر سطح لغزش سریع ترمینالی مطابق رابطه (۱۷) استفاده شده است [8,36].

$$s = \dot{e} + \alpha e + \beta|e|^{\gamma}\mathrm{sgn}(e)$$
$$e = \eta_d - \eta \quad (۱۹)$$

در رابطه (۱۹) α، β و γ ثابت و مثبت هستند. e خطای تعقیب مسیرهای مطلوب ربات (η_d) می‌باشد. به منظور بهبود دقت سیستم حلقه بسته، سطح لغزشی رابطه (۱۹) با اضافه کردن یک متغیر دینامیکی مطابق رابطه (۲۰) اصلاح شده است [8].

$$\sigma = s + \lambda \int s(\tau)\, d\tau \quad (۲۰)$$

در رابطه (۲۰) λ یک ماتریس قطری ۶ × ۶ است که درایه‌های روی قطر اصلی اعداد ثابت و مثبت می‌باشند. به منظور دستیابی به قانون کنترلی مشتق سطح لغزش برابر با صفر قرار داده شده است. رابطه (۲۱) مشتق سطح لغزش را نشان می‌دهد.

$$\dot{\sigma} = \dot{s} + \lambda s = \ddot{e} + (\gamma\beta|e|^{\gamma-1} + \lambda + \alpha)\dot{e} + \lambda\alpha e + \lambda\beta|e|^{\gamma}\mathrm{sgn}(e) \quad (۲۱)$$

همانطور که از رابطه (۲۱) مشخص است، در ترم $\beta\gamma|e|^{\gamma-1}\dot{e}$ توان $\gamma - 1$ می‌تواند منفی باشد. در صورتی که $e = ۰$ و $\dot{e} \neq ۰$ باشد و $\gamma - 1$ منفی باشد تکینگی اتفاق خواهد افتاد. با استفاده از رابطه (۱۹) داریم.

$$\gamma\beta|e|^{\gamma-1}\dot{e} = \gamma\beta|e|^{\gamma-1}(-\alpha e - \beta|e|^{\gamma}\mathrm{sgn}(e))$$
$$\gamma\beta|e|^{\gamma-1}\dot{e} = -\alpha\gamma\beta|e|^{\gamma} - \beta|e|^{2\gamma-1}\mathrm{sgn}(e) \quad (۲۲)$$

در رابطه (۲۲) در صورتی که $0 < \gamma < \frac{1}{2}$ باشد تکینگی

وجود نخواهد داشت. در ادامه قانون کنترل با برابر صفر قرار دادن مشتق سطح لغزش σ و اضافه کردن عبارات مناسب به صورت رابطه (۲۳) در نظر گرفته شده است.

$$\tau_a = C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) - \hat{F}(Z) + M\ddot{q}_d - M((\gamma\,\beta|e|^{\gamma-1} + \lambda + \alpha)\dot{e} + \lambda\alpha e + \lambda\beta|e|^{\gamma}\mathrm{sgn}(e)) - \frac{\sigma}{\|\sigma\|}\left(\tilde{p}\tanh\left(\frac{\tilde{p}}{l}\right) + 0.2785l\right) - \frac{k_{12}}{2}\frac{\sigma}{\|\sigma\|^2}\sqrt{\sigma^T\sigma} - \frac{k_{22}}{2}\sigma\sigma^T\sigma$$

$$\tau_b = -\frac{\|\tau_a\|\sigma}{\|\sigma\|(1-\Omega_{max}(\Lambda))}$$

$$\tau = \tau_a + \tau_b$$

$$\hat{F}(Z) = w^T E_i(Z) + \varepsilon_i$$

$$\tilde{p} = \hat{F} - F \quad (۲۳)$$

در رابطه (۲۳)، Ω_{max} بزرگ‌ترین مقدار ویژه Λ می‌باشد و $\tilde{p}$ حد بالای خطای تخمین اغتشاشات، عدم قطعیت‌ها و عیب سیستم است. به منظور اثبات پایداری تابع لیاپانوف به صورت رابطه (۲۴) در نظر گرفته شده است.

$$V = \frac{1}{2}\sigma^T M\sigma \quad (۲۴)$$

با مشتق‌گیری از رابطه (۲۴) داریم:

$$\dot{V} = \sigma^T M\dot{\sigma} + \frac{1}{2}\sigma^T\dot{M}\sigma \quad (۲۵)$$

با جای‌گذاری رابطه (۲۳) در رابطه (۲۵) و ساده‌سازی، رابطه (۲۶) به دست می‌آید:

$$\dot{V} = \sigma^T M(M^{-1}(-C(\nu)\nu - D(\nu)\nu - g(\eta) + (\tau_a+\tau_b)(1-\Lambda) + F(Z)) - \ddot{q}_d + (\gamma\,\beta|e|^{\gamma-1} + \lambda + \alpha)\dot{e} + \lambda\alpha e + \lambda\beta|e|^{\gamma}\mathrm{sgn}(e)) \quad (۲۶)$$

به منظور ساده‌سازی رابطه (۲۶) داریم:

$$\sigma^T(\tau_b(1-\Lambda) - \tau_a\Lambda)) = -(1-\Lambda)\frac{\|\tau_a\|\|\sigma\|}{(1-\Omega_{max}(\Lambda))} - \sigma^T\tau_a\Lambda \le -\|\tau_a\|\|\sigma\| - \sigma^T\tau_a\Lambda \le 0 \quad (۲۷)$$

رابطه (۲۷) در حالتی که آرایه‌های ماتریس قطری Λ در بازه (۰-۰/۷۲) باشد صادق است [16]. با توجه به رابطه (۲۷) داریم:

$$\dot{V} = \sigma^T\Big(-\hat{F}(Z) + F(Z) + \tau_b(1-\Lambda) - \tau_a\Lambda - \frac{k_{12}}{2}\frac{\sigma}{\|\sigma\|^2}\sqrt{\sigma^T\sigma} - \frac{k_{22}}{2}\sigma\sigma^T\sigma - \|\sigma\|\left(\tilde{p}\tanh\left(\frac{\tilde{p}}{l}\right) + 0.2785l\right)\Big) \le \sigma^T(\tilde{p}) - \|\sigma\|\left(\tilde{p}\tanh\left(\frac{\tilde{p}}{l}\right) + 0.2785l\right) - \frac{k_{12}}{2}(\sigma^T\sigma)^{\frac{1}{2}} - \frac{k_{22}}{2}(\sigma\sigma^T)^2 \le -\frac{k_{12}}{2M}(V)^{\frac{1}{2}} - \frac{k_{22}}{2M}(V)^2 \le -\frac{k_{12}}{2{\Omega_{max}}^{0.5}M}(V)^{\frac{1}{2}} - \frac{k_{22}}{2{\Omega_{max}}^{2}M}(V)^2 \quad (۲۸)$$

مطابق لم ۱ می‌توان نتیجه گرفت که سیستم در یک زمان ثابت به مقادیر مطلوب هم‌گرا است و زمان هم‌گرایی T در رابطه زیر صدق می‌کند:

$$T \le T_{max} = \frac{1}{p(a-1)} + \frac{1}{q(b-1)}$$

$$a = \frac{1}{2}, b = 2, p = \left(-\frac{k_{12}}{2{\Omega_{max}}^{0.5}M}\right), q = \left(-\frac{k_{12}}{2{\Omega_{max}}^{2}M}\right) \quad (۲۹)$$

به منظور مقابله با اغتشاشات و عدم قطعیت‌های با دامنه نامعلوم و عیب سیستم، قانون تطبیق رابطه (۳۰) برای تخمین تابع وزنی شبکه عصبی شعاعی در نظر گرفته شده است.

$$\dot{\hat{w}} = Q(\|\sigma\| - P\hat{w}^T\hat{w})$$

$$\tilde{w} = \hat{w} - w \quad (۳۰)$$

که در آن P و Q ثوابت مثبتی هستند. $\hat{w}$ تخمین تابع وزنی برای هریک از لایه‌های شبکه عصبی و σ سطح لغزش دینامیکی می‌باشد. برای اثبات پایداری روش کنترلی با در نظر گرفتن قانون تطبیق، تابع لیاپانوف جدید به صورت رابطه (۳۱) در نظر گرفته شده است.

$$V_2 = \frac{1}{2}\sigma^T M\sigma + \frac{1}{2Q}\tilde{w}^2 \quad (۳۱)$$

با مشتق گیری از رابطه (۳۱) داریم:

$$\dot{V}_2 = \sigma^T M\dot{\sigma} + \frac{1}{2}\sigma^T \dot{M}\sigma + \frac{1}{Q}\widetilde{w}\dot{\hat{w}} \quad (۳۲)$$

با جایگذاری رابطه (۲۳) در رابطه (۳۲) و ساده‌سازی، رابطه (۳۳) به دست می‌آید.

$$\begin{aligned}\dot{V}_2 = \sigma^T M\big(M^{-1}(-C(\nu)\nu - D(\nu)\nu - g(\eta) +\\ (T_a + \tau_b)(1-\Lambda) + F(Z)\big) -\\ \ddot{q_d} + (\gamma\,\beta|e|^{\gamma-1} + \lambda + \alpha)\dot{e} + \lambda\alpha e +\\ \lambda\beta|e|^{\gamma}\mathrm{sgn}(e)) + \frac{1}{Q}\widetilde{w}\dot{\hat{w}}\end{aligned} \quad (۳۳)$$

با ساده‌سازی رابطه (۳۳) داریم:

$$\begin{aligned}\dot{V}_2 &\le \sigma^T(\tilde{p}) - \|\sigma\|\left(\tilde{p}\tanh\left(\frac{\tilde{p}}{l}\right) + 0.2785l\right)\\ &-\frac{k_{12}}{2}(\sigma^T\sigma)^{\frac{1}{2}} - \frac{k_{22}}{2}(\sigma\sigma^T)^2 + \widetilde{w}(\|\sigma\| - P\widehat{w})\\ &\le -\frac{k_{12}}{2M}(V)^{\frac{1}{2}} - \frac{k_{22}}{2M}(V)^2 - P\widetilde{w}\widehat{w}^T\widehat{\omega}\\ &\le -\frac{k_{12}}{2M}(V_2)^{\frac{1}{2}} - \frac{k_{22}}{2M}(V_2)^2 + \Upsilon\end{aligned} \quad (۳۴)$$

با استفاده از لم ۱ و لم ۲ و تعریف پارامتر $0 < \Xi < 1$:

$$\dot{V}_2 \le -\Xi\frac{k_{12}}{2M}(V_2)^{\frac{1}{2}} - (1-\Xi)\frac{k_{12}}{2M}(V_2)^{\frac{1}{2}} - \frac{k_{22}}{2M}(V_2)^2 + \Upsilon$$

$$\begin{aligned}\dot{V}_2 \le -\Xi\frac{k_{12}}{2M}(V_2)^{\frac{1}{2}} - \Xi\frac{k_{12}}{2M}(V_2)^{\frac{1}{2}} -\\ (1-\Xi)\frac{k_{22}}{2M}(V_2)^2 + \Upsilon\end{aligned} \quad (۳۵)$$

برای رابطه (۳۵) چند حالت متصور است. اگر $V_2 > (\Upsilon/[(1-\Xi)\frac{k_{12}}{2M}])^2$ باشد مطابق با لم ۱ می‌توان نتیجه گرفت که:

$$\dot{V}_2 \le -\Xi\frac{k_{12}}{2M}(V_2)^{\frac{1}{2}} - \frac{k_{22}}{2M}(V_2)^2$$

$$T \le T_{max} = \frac{1}{\Xi\frac{k_{12}}{2M}\left(\frac{1}{2}-1\right)} + \frac{1}{\frac{k_{22}}{2M}(2-1)} \quad (۳۶)$$

اگر $V_2 > (\Upsilon/[(1-\Xi)\frac{k_{22}}{2M}])^{0.5}$ باشد مطابق با لم ۱ می‌توان نتیجه گرفت که:

$$\dot{V}_2 \le -\frac{k_{12}}{2M}(V_2)^{\frac{1}{2}} - \Xi\frac{k_{22}}{2M}(V_2)^2$$

$$T \le T_{max} = \frac{1}{\frac{k_{12}}{2M}\left(\frac{1}{2}-1\right)} + \frac{1}{\Xi\frac{k_{22}}{2M}(2-1)} \quad (۳۷)$$

مطابق با لم ۲ می‌توان نتیجه گرفت که تابع لیاپانوف V_2 در زمان محدود پایدار است و مقدار حالت‌های سیستم در زمان محدود T_{max} به مقادیر باقی‌مانده $\breve{R}$ میل خواهد کرد.

$$\breve{R} = \left\{X \,\middle|\, V(X) \le \min\left\{\left[\frac{\Upsilon}{(1-\Xi)\frac{k_{22}}{2M}}\right]^{\frac{1}{2}}, \left[\frac{\Upsilon}{[(1-\Xi)\frac{k_{12}}{2M}]}\right]^2\right\}\right\} \quad (۳۸)$$

شبیه‌سازی

در این مقاله در ابتدا معادلات دینامیکی ربات شبیه‌سازی شده و با استفاده از روش کنترل پیشنهادی، مسیرهای مرجع ردیابی شده‌اند. بهینه‌سازی هم‌زمان پارامترهای کنترل‌کننده و پارامترهای شبکه عصبی به منظور دستیابی به کمترین زمان هم‌گرایی و کمترین خطای ردیابی توسط الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی انجام شده است. به منظور نشان دادن مقاوم بودن کنترل‌کننده‌های طراحی شده در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت‌ها، عدم قطعیت پارامتری معادل ۲۰ درصد مقدار نامی پارامترها در نظر گرفته شده است. محدوده اشباع برای عملگرها ۲۰۰ نیوتن متر در نظر گرفته شده است. با توجه به پارامترهای کنترل‌کننده، زمان هم‌گرایی به مقادیر مطلوب می‌بایست کمتر از ۵ ثانیه باشد. لازم به ذکر است اغتشاشات وارده به صورت رابطه (۳۹) در نظر گرفته شده است. در این مقاله برای تخمین اغتشاشات خارجی، عدم قطعیت‌های مدل و عیب سیستم از شبکه عصبی تابع شعاعی استفاده شده است که در آن برای هر یک از درجات آزادی سیستم یک شبکه عصبی ۱۰ لایه‌ای در نظر گرفته شده و پارامترهای ω تابع وزنی، ε خطای تخمین، ∇ عرض تابع و ζ مرکز تابع گوسی و همچنین پارامترهای هر یک از کنترل‌کننده‌ها برای دستیابی به بهترین عملکرد ممکن با هدف کمینه‌سازی مقدار خطای تعقیب مسیرهای مطلوب به کمک روش بهینه‌سازی الگوریتم جستجوی هارمونی تعیین شده است. بدین منظور در ابتدا یک حدس اولیه از مقدار پارامترها به دست آمده است. سپس یک بازه مناسب برای هر یک از پارامترها (به مرکزیت حدس اولیه) در نظر گرفته شده و در نهایت به کمک

الگوریتم جستجوی هارمونی مقدار پارامترها تعیین شده است. در رابطه (۴۰) تابع هزینه مورد استفاده در بهینه‌سازی ارائه شده است.

$$\tau_d = n\begin{bmatrix} -1.5\sin(0.6t) \\ -\sin(0.5t) \\ -2\sin(0.4t) - 5\cos(0.3t) \\ -1.5\cos(0.2t) \\ -\sin(0.3t) - 3\cos(0.3t) \\ -2\sin(0.1t) \end{bmatrix} \quad (۳۹)$$

$$\text{Cost Function} = \int_0^t e^2 \ dt \quad (۴۰)$$

در رابطه (۳۹) n یک عدد ثابت و مثبت است که در ابتدای شبیه‌سازی یک در نظر گرفته شده است. عیب عملگرها به صورت عیب جزئی در ثانیه ۶۰ و مطابق رابطه (۴۱) اعمال شده است [8].

$$\text{Fault} = \beta(t - T_f)\Omega(\eta, \dot{\eta}, \tau)$$

$$\beta(t - T_f) = \begin{cases} 0 & t \le T_f \\ 1 - e^{-\xi}(t - T_f) & t > T_f \end{cases}$$

$$\Omega(\eta, \dot{\eta}, \tau) = \begin{bmatrix} -1.5\sin(\dot{x}) + 0.75\cos(x) + 0.3\tau_x \\ \sin(\dot{y}) + 0.5\sin(y) + 0.4\tau_y \\ 0.5\sin(\dot{z}) - 1.5\cos(z) + 0.3\tau_z \\ -1.5\sin(\dot{\varphi}) + 0.5\tau_\varphi \\ \sin(\dot{\theta}) + 1.5\sin(\theta) + 0.4\tau_\theta \\ -\cos(\dot{\Psi}) + 0.5\cos(\Psi) + 0.5\tau_\Psi \end{bmatrix} \quad (۴۱)$$

در رابطه (۴۱)، T_f زمان شروع عیب عملگر، ξ یک پارامتر ثابت و Ω تابعی براساس موقعیت، سرعت و سیگنال کنترلی می‌باشد. در ادامه نمودارهای تعقیب مسیرهای مرجع، خطای ردیابی و تلاش کنترلی به منظور مقایسه عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی با کنترل‌کننده ارائه شده توسط مرجع [2] و کنترل‌کننده PID برای ۱۰۰ ثانیه شبیه‌سازی ارائه شده است. قانون کنترل مرجع [2] در رابطه (۴۲) ارائه شده است.

$$\tau = n + M\{J_d^{-1}(\eta)[\ddot{\eta}_d + k_1\breve{\eta}] + J_d(\eta)[\dot{\eta}_d + k_1\breve{\eta}]\} + M[k_2\breve{v} + J^T(\eta)\breve{\eta}]$$

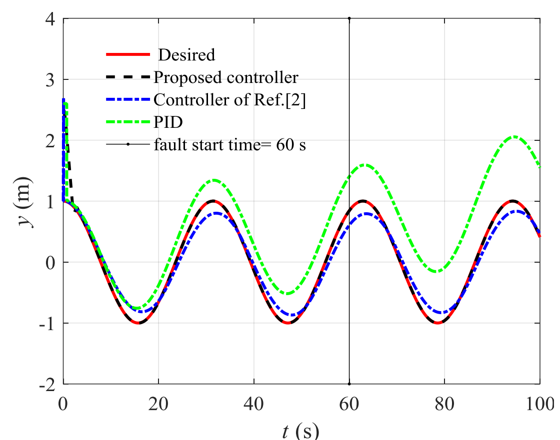
$$n = C(v)v + D(v)v + g(\eta)$$

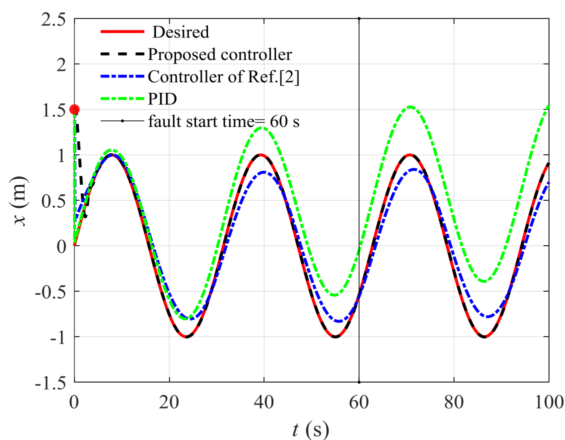
$$\breve{\eta} = \eta_d - \eta$$

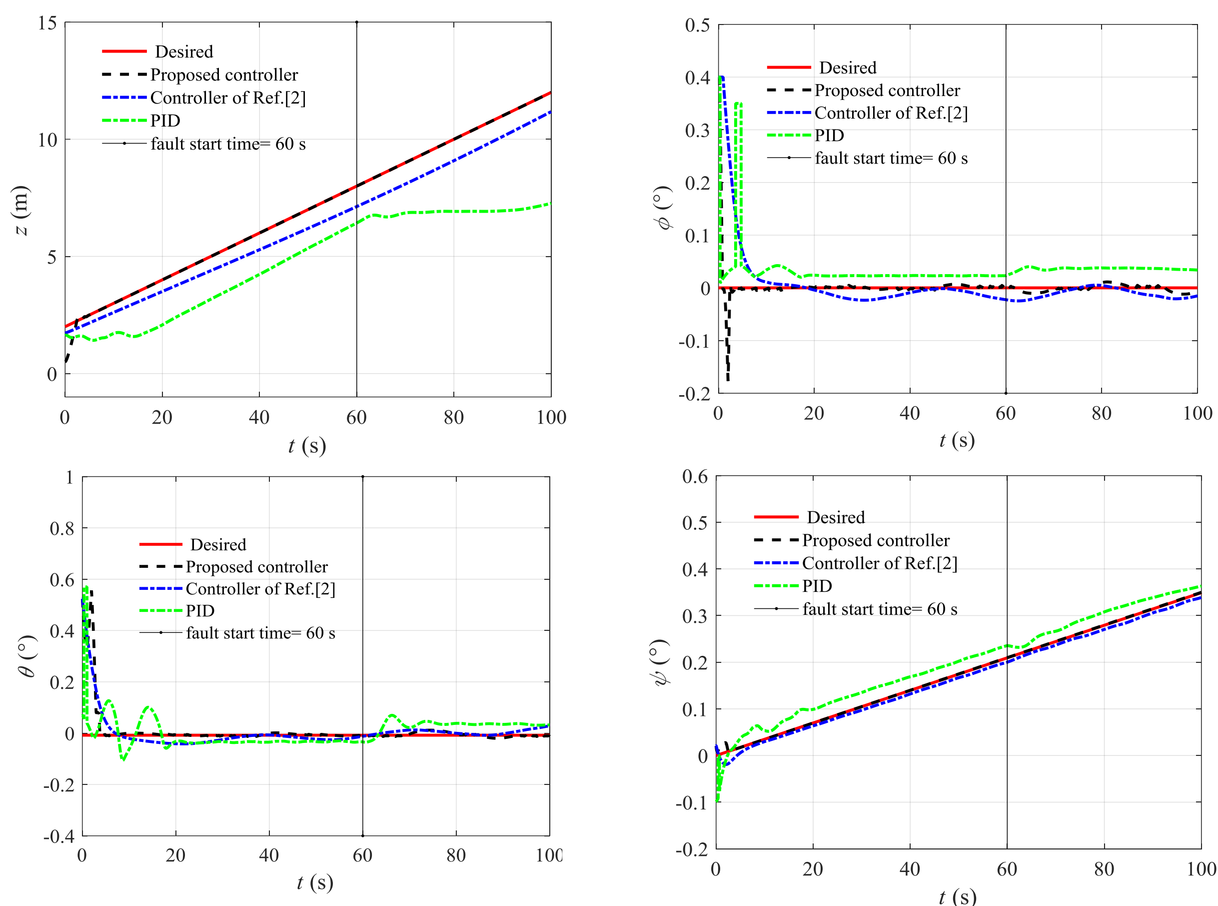
$$\breve{v} = v_c - v$$

$$v_c = J_d^{-1}(\dot{\eta}) \quad (۴۲)$$

در رابطه (۳۸)، k_1 و k_2 پارامترهای ثابت و مثبت هستند. η_d موقعیت مطلوب و v_c سرعت مطلوب در دستگاه بدنی می‌باشد. در ادامه در شکل (۳) نمودار مسیرهای مرجع زیردریایی و تعقیب مسیر برای هر سه کنترل‌کننده ارائه شده است. نتایج ارائه شده برای کنترل کننده پیشنهادی براساس پارامترهای جدول (۲) ارائه شده است.





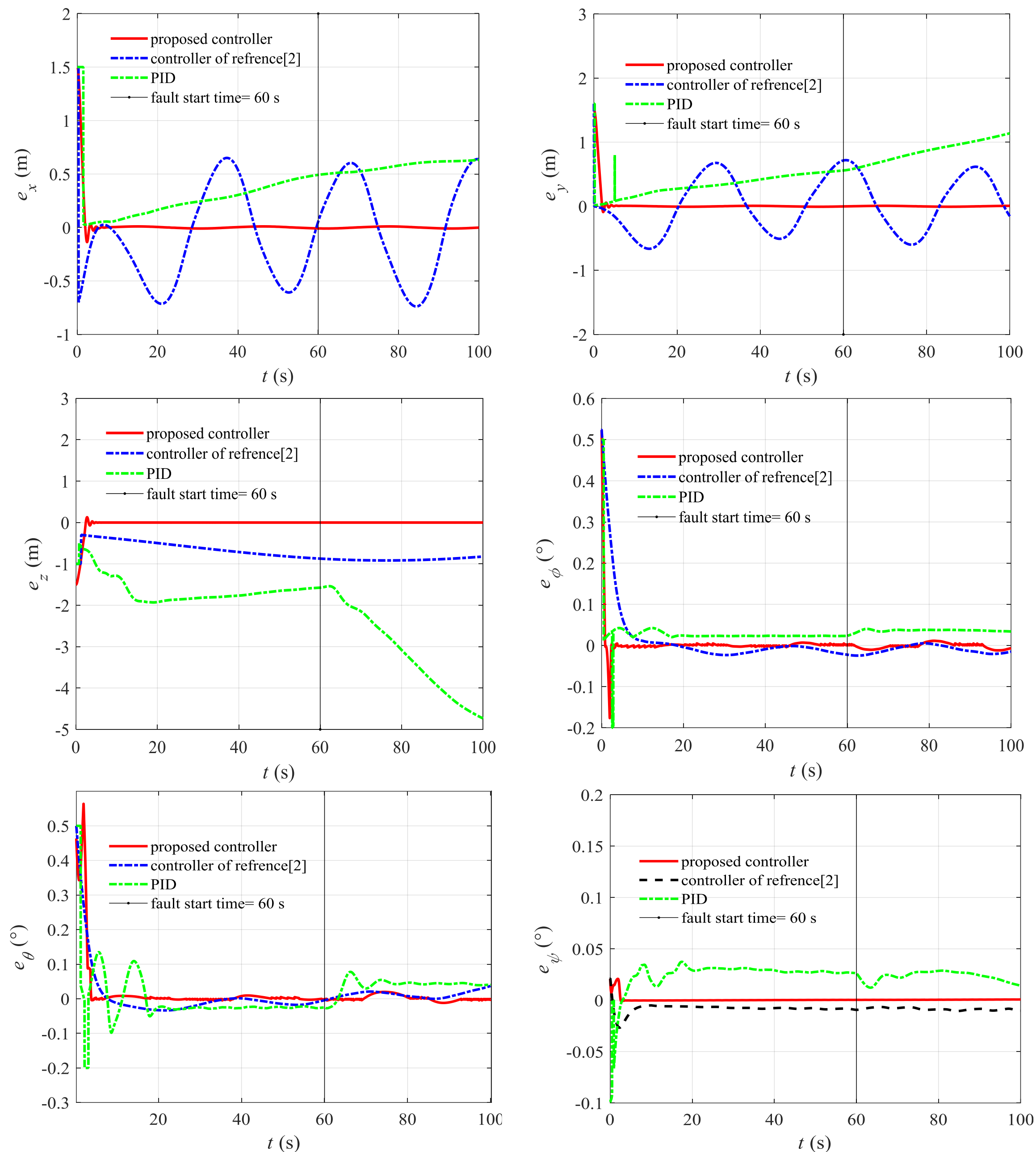


شکل ۳ تعقیب مسیرهای مرجع

جدول ۲ پارامترهای کنترل‌کننده پیشنهادی

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۲/۹۱۰	k_{12}	۴/۰۳۳	α
۳/۱۳۰	k_{22}	۰/۴۴۳	γ
۱/۳۷۰	l	۰/۷۲۰	β
۱۰/۰۰۰	L	۲۷/۰۶۵	λ
۰/۹۷۷	P	۰/۰۳۳	ε^*
		۱/۳۱۱	Q

همان گونه که در شکل (۳) قابل مشاهده است، کنترل‌کننده پیشنهادی با دقت بالاتری در هر شش مختصات تعریف شده مسیرهای مرجع را تعقیب می‌کند. کنترل‌کننده پیشنهادی و کنترل‌کننده ارائه شده در مرجع [2] عملکرد مناسبی را در برابر عیب سیستم از خود نشان داده‌اند اما کنترل‌کننده PID در برابر عیب سیستم مقاوم نبوده و بعد از اعمال عیب به سیستم عملکرد آن تضعیف شده است. کنترل‌کننده ارائه شده در مرجع [2] و کنترل‌کننده PID در کنترل زاویه φ، θ و Ψ که در آن سیگنال کنترلی کمتر از محدوده اشباع می‌باشد پاسخ‌های مناسبی را ارائه داده است. اما در تعقیب مسیرهای x، y و z به دلیل داشتن سیگنال کنترلی بزرگ‌تر از محدوده اشباع، عملکرد مناسبی را ارائه نمی‌دهد. در کنترل‌کننده پیشنهادی با به‌کارگیری کنترل فعال تحمل‌پذیر عیب، در نظر گرفتن اشباع ورودی و تعریف کنترل زمان ثابت مبتنی بر روش کنترل مقاوم تعقیب مفاصل مسیرهای مرجع به خوبی صورت گرفته است. در ادامه به منظور مقایسه بهتر، سیگنال خطای تعقیب برای کنترل‌کننده‌ها در شکل (۴) ارائه شده است.



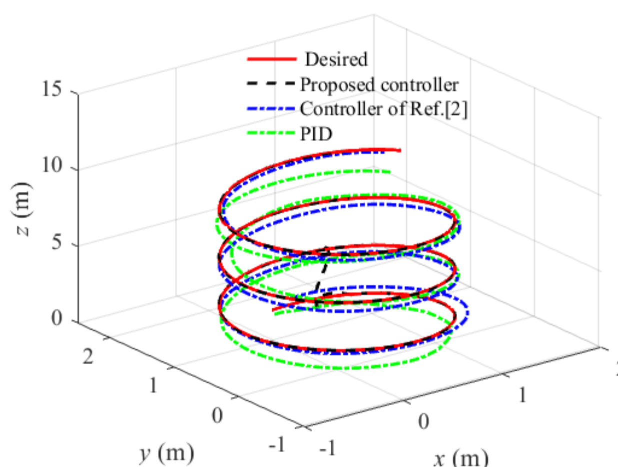
شکل ۴ خطای ردیابی

شکل (۴) نشان دهنده عملکرد مناسب کنترل کننده‌های پیشنهادی نسبت به روش مرجع [2] و کنترل کننده PID در تعقیب مسیرهای مرجع می‌باشد. کنترل‌کننده پیشنهادی با تعریف سطح لغزش ترمینالی سریع قابلیت همگرایی سرعت بالا و زمان ثابت به مسیرهای مرجع را دارا می‌باشد. در تمام نمودارهای ارائه شده در شکل (۳) و (۴) زمان همگرایی به مسیرهای مرجع برای کنترل‌کننده پیشنهادی کمتر از ۵ ثانیه می‌باشد. این زمان کمتر از زمان کنترل‌کننده مرجع [2] و کنترل‌کننده PID می‌باشد. همچنین برتری کنترل‌کننده پیشنهادی و کنترل‌کننده مرجع [2] نسبت به کنترل‌کننده PID در تحمل عیب سیستم با توجه به عملکرد آن‌ها در تعقیب مسیرهای مرجع قابل مشاهده است. در سیگنال خطای کنترل‌کننده PID، بعد از شروع عیب (ثانیه ۶۰)، دامنه سیگنال خطا روند افزایشی را نشان می‌دهد. در شکل (۵) مسیر مطلوب حرکت زیردریایی در مختصات اینرسی و نحوه تعقیب آن توسط کنترل‌کننده‌ها ارائه شده است.

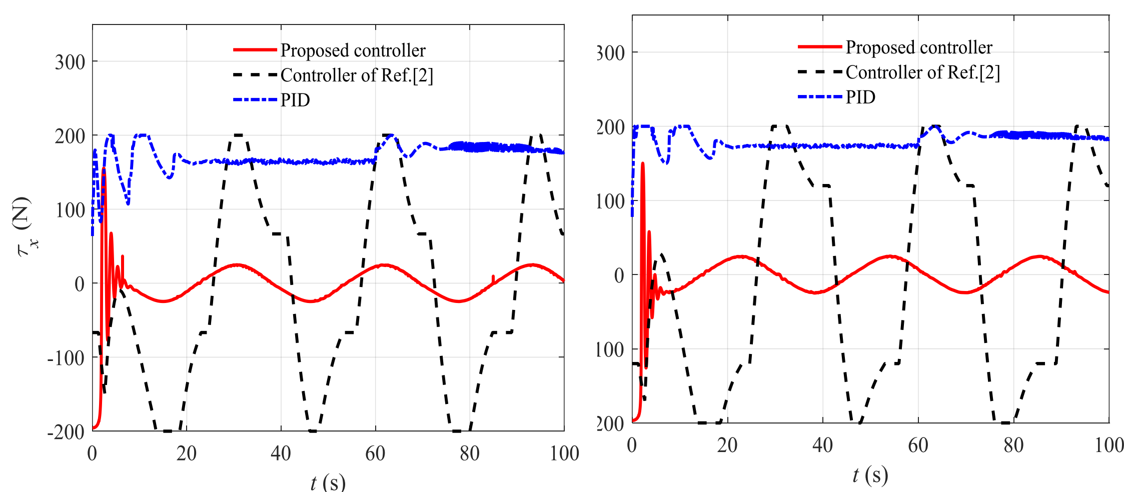
شکل (۵) تعقیب مناسب مسیر مرجع زیردریایی در دستگاه

اینرسی توسط کنترل‌کننده پیشنهادی را نشان می‌دهد. تعقیب مسیر حرکت زیردریایی توسط کنترل‌کننده مرجع [2] و کنترل‌کننده PID به دلیل تعقیب نامناسب مسیرهای مرجع در مختصات x، y و z با خطا انجام شده است. در شکل (۶) سیگنال کنترلی برای هر سه کنترل‌کننده نشان داده شده است.

شکل (۶) نشان می‌دهد که در روش پیشنهادی تا رسیدن کنترل‌کننده به هم‌گرایی یعنی تا قبل از زمان ۵ ثانیه پدیده چترینگ در کنترل‌کننده پیشنهادی وجود دارد و بعد از این زمان چترینگ کاهش می‌یابد. در کنترل‌کننده پیشنهادی با در نظر گرفتن سطح لغزش و قانون کنترل مناسب پدیده چترینگ که از عیوب کنترل-کننده مد لغزشی است کاهش یافته است. در کنترل‌کننده پیشنهادی مسئله ورودی اشباع در نظر گرفته شده است. بنابراین سیگنال کنترلی در محدوده اشباع تعریف شده قرار گرفته و تعقیب مسیرهای مرجع به خوبی انجام شده است. در کنترل‌کننده مرجع [2] و کنترل‌کننده PID، سیگنال‌های کنترلی بالاتر از محدوده اشباع قرار گرفته و در نتیجه تعقیب مسیرهای مرجع با مشکل روبه‌رو شده است. در این مقاله از ده لایه شبکه عصبی پایه شعاعی برای تخمین اغتشاشات و عیوب سیستم استفاده شده است که ضرایب وزنی آن از قانون تطبیق رابطه (۳۰) حاصل شده است. در شکل (۷) مقادیر ضرایب وزنی در زمان‌های مختلف نشان داده شده است که روند مناسبی را نشان می‌دهد.

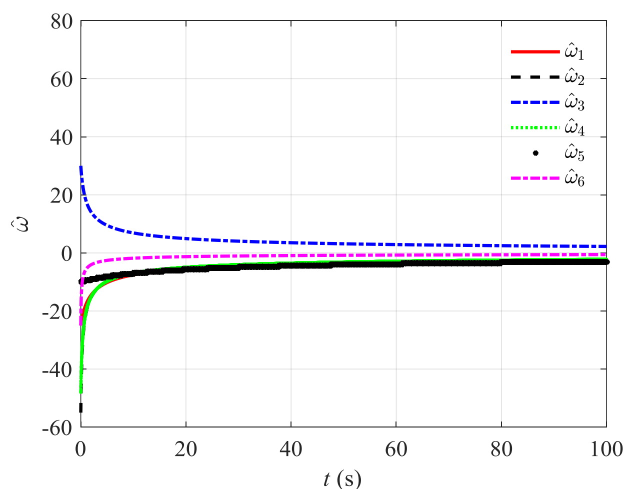


شکل ۵ تعقیب مسیر زیردریایی در دستگاه اینرسی

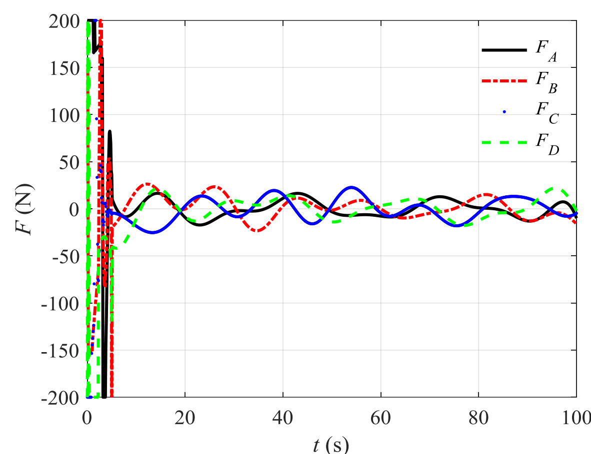


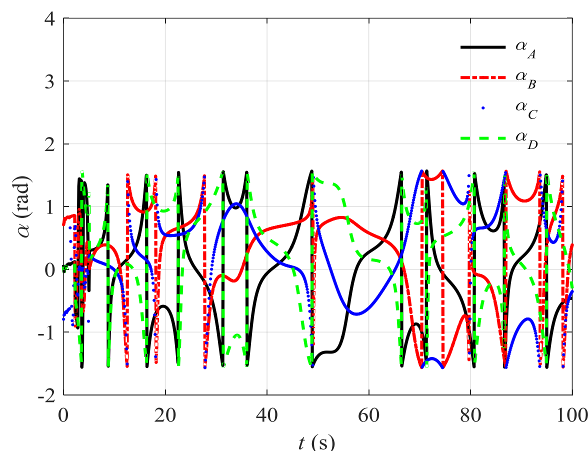
شکل ۶ سیگنال‌های کنترلی

شش سیگنال کنترلی مورد نیاز برای کنترل زیردریایی به کمک چهار عملگر که قابلیت چرخش حول محور اتصال خود به بدنه را دارند، تأمین می‌گردد. در شکل (۸)، سری زمانی نیرو و زاویه چرخش این عملگرها با زمان ارائه شده است.



شکل ۷ رشد ضرایب وزنی در ساختار شبکه عصبی

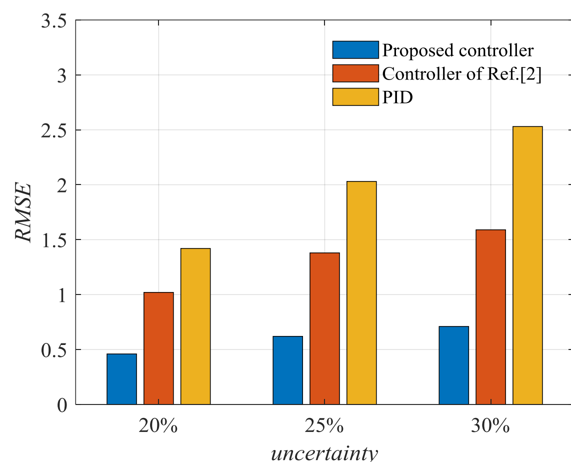


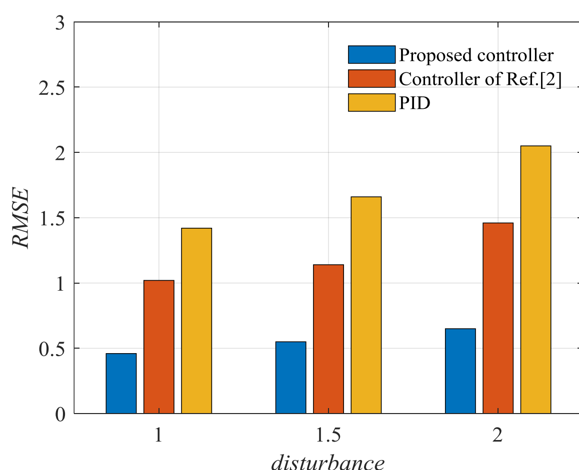


شکل ۸ نیرو و زاویه عملگرهای زیردریایی

در ادامه مقاوم بودن هر سه کنترل‌کننده با افزایش میزان اغتشاشات و عدم قطعیت‌های سیستم و محاسبه معیار جذر میانگین مربعات خطاهای تعقیب مسیر مرجع بررسی شده و در شکل (۹) ارائه شده است. در شکل (۹) اغتشاشات وارده بر سیستم با افزایش مقدار n (در رابطه (۳۵) به ۱/۵ و ۲ و عدم قطعیت‌ها با افزایش ۲۵ و ۳۰ درصدی مقدار نامی متغیرها تغییر یافته است.

شکل (۹) نشان‌دهنده برتری عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی نسبت به کنترل‌کننده مرجع [2] و کنترل‌کننده PID در مقابله با اغتشاشات و عدم قطعیت‌های سیستم به دلیل قانون تخمین مناسب و در نظر گرفتن اشباع عملگر می‌باشد. با افزایش اغتشاشات و عدم قطعیت‌های سیستم و نیاز به افزایش تلاش کنترلی خطا در کنترل‌کننده مرجع [2] و کنترل‌کننده PID افزایش یافته است که مهم‌ترین عامل آن عبور سیگنال کنترلی از محدوده اشباع در نظر گرفته شده برای عملگرها می‌باشد. این موضوع در کنترل‌کننده پیشنهادی با در نظر گرفتن مسئله اشباع عملگر و تخمین مناسب عیب، اغتشاش و عدم قطعیت سیستم مرتفع شده است. میزان افزایش معیار خطا با افزایش اغتشاشات و عدم قطعیت‌های سیستم در کنترل‌کننده PID نسبت به کنترل کننده‌های دیگر قابل توجه می‌باشد.





شکل ۹ خطای تعقیب در حضور اغتشاشات و عدم قطعیت‌های مختلف

نتیجه گیری

در این مقاله با ترکیب کنترل‌کننده تطبیقی مد لغزشی دینامیکی سریع ترمینالی و شبکه عصبی تابع پایه شعاعی یک روش کنترل فعال تحمل‌پذیر عیب با در نظر گرفتن اشباع عملگر ارائه شده و جهت تعقیب مسیرهای مطلوب یک زیردریایی مورد استفاده قرار گرفته است. کنترل‌کننده ارائه شده در مرجع [۲] و کنترل کننده PID مقایسه شده است که نتایج برتری روش کنترلی پیشنهادی را در تعقیب مسیرهای مرجع، مقابله با اغتشاشات، عدم قطعیت‌ها و عیب سیستم، زمان هم‌گرایی و مقدار سیگنال کنترلی نشان داده

است. در کنترل‌کننده پیشنهادی با تعریف مناسب سطح لغزش و قانون کنترل، پدیده چترینگ که از عیوب کنترل کننده مد لغزشی می‌باشد، کاهش یافته است. همچنین استفاده از قانون تطبیق مناسب، تخمین اغتشاشات و عیب عملگر و در نظر گرفتن اشباع عملگر در روش کنترل پیشنهادی باعث تعقیب دقت بالای مسیرهای مرجع و قرارگیری محدوده سیگنال کنترلی در محدوده مجاز شده است. روش کنترل پیشنهادی یک روش کنترل با همگرایی زمان ثابت می‌باشد که همگرایی در زمان کمتر از ۵ ثانیه را برای تمام مسیرهای مرجع ایجاد کرده که شرایط مطلوب‌تری نسبت به کنترل‌کننده ارائه شده توسط مرجع [2] و کنترل کننده PID می‌باشد. همچنین نتایج نشان داده است که عملکرد کنترل‌کننده PID با اعمال عیب، اغتشاش و عدم قطعیت به سیستم به شدت تصعیف شده است. به منظور ادامه پژوهش حاضر اعمال روش کنترلی ارائه شده بر روی مدل زیر دریایی با در نظر گرفتن تمام آرایه‌های موجود در ماتریس اینرسی و همچنین در نظر گرفتن عیب کامل عملگر پیشنهاد می‌گردد.

واژه نامه

Sliding mode	مد لغزشی
actuator	عملگر
Neural network	شبکه عصبی
uncertainty	عدم قطعیت
disturbance	اغتشاش
chattering	چترینگ
Lyapunov	لیاپانوف
Fault tolerant control	کنترل تحمل‌پذیر عیب

مراجع

[1] M. L. Seto, and A. Z. Bashir, "Fault tolerance considerations for long endurance AUVs", *Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 1-6, 2017. https://doi.org/10.1109/RAM.2017.7889661

[2] J. Kadiyam, A. Parashar, S. Mohan, and D. Deshmukh, "Actuator fault-tolerant control study of an underwater robot with four rotatable thrusters", *Ocean Engineering*, vol. 197, pp. 106929, 2020. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.106929

[3] Y. K. Alekseev, V. V. Kostenko, and A. Y. Shumsky, "Use of identification and fault diagnostic methods for underwater robotics", *Proceedings of OCEANS*, vol. 2, pp. 489-494, 1994. https://doi.org/10.1109/OCEANS.1994.364093

[4] M. Navi, M. Davoodi, and N. Meskin, "Sensor fault detection and isolation of an autonomous underwater vehicle using partial Kernel PCA", *IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM)*, pp. 1-9, 2015. https://doi.org/10.1109/ICPHM.2015.7245022

[5] E. Omerdic, G.N. Roberts and P. Ridao, , "Fault Detection and Accommodation for ROVs", *IFAC Proceedings Volumes, vol. 36, pp. 127-132, 2003.* https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)37795-9

[6] M. Mokhtari, M. Taghizadeh, and P. Ghaf-Ghanbari, "Adaptive second-order sliding model-based fault-tolerant control of a lower-limb exoskeleton subject to tracking the desired trajectories augmented by CPG algorithm", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 44, no. 423, 2022. https://doi.org/10.1007/s40430-022-03694-6

[7] L. Yang, M. Zhang, Y. Wang, and J. Wu, "Study on simultaneous fault tolerant control of AUV thrusters". *IEEE International Conference on Automation and Logistics*, pp. 105-110, 2008. https://doi.org/10.1109/ICAL.2008.4636129

[8] M. Mokhtari, M. Taghizadeh, and P. Ghaf-Ghanbari, "Fault tolerant control based on backstepping nonsingular terminal integral sliding mode and impedance control for a lower limb exoskeleton", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science (PIC)*, vol. 236, no. 6, pp. 2698-2713, 2022. https://doi.org/10.1177/09544062211035792

[9] T. K. Podder, G. Antonelli, and N. Sarkar, "Fault tolerant control of an autonomous underwater vehicle under thruster redundancy: simulations and experiments". *Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings*, 2000. https://doi.org/10.1109/ROBOT.2000.844770

[10] Q. Liu, and D. Zhu, "Fault-tolerant control of unmanned underwater vehicles with continuous Faults: simulations and experiments", International Journal of Advanced Robotic Systems, vol. 6, no. 4, pp. 301-308, 2009. https://doi.org/10.5772/7244

[11] G. C. Karras, P. Marantos, C. P. Bechlioulis, and K. J. Kyriakopoulos, "Unsupervised Online System Identification for Underwater Robotic Vehicles", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 44, no. 3, pp. 642-663, 2019. https://doi.org/10.1109/JOE.2018.2827678

[12] C. Zhu, B. Huang, B. Zhou, Y. Su, and E. Zhang, "Adaptive model-parameter-free fault-tolerant trajectory tracking control for autonomous underwater vehicles", *ISA Transactions*, vol. 144, pp. 57-71, 2021. https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.12.059

[13] A. Ahmed Amin, Kh. Mahmood Hassan, "A review of fault tolerant control systems: Advancements and applications". *Measurement*, vol. 143, pp. 58-68, 2019. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.083

[14] C. Shen, Y. Shi, and B. Buckham, "Trajectory tracking control of an autonomous underwater vehicle using Lyapunov-based model predictive control", *IEEE*, vol. 65, no. 7, pp. 5796–5805, 2018. https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2779442

[15] F. Vahidifar, "An Improved Shooting Method for a Class of Switching Optimal Control Problems", *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 31, no. 1, pp. 123-138, 2020. (In Persian) https://doi.org/10.22067/fum-mech.v31i1.77967

[16] Y. Hu, H. Yan, H. Zhang, M. Wang, and L. Zeng, "Robust Adaptive Fixed-Time Sliding-Mode Control for Uncertain Robotic Systems with Input Saturation", *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 53, no. 4, pp. 2636-2646, 2023. https://doi.org/10.1109/TCYB.2022.3164739

[17] M. Mosalsal, and M. Khodabandeh, "Variable-Pitch Control of a Quadrotor Using Feedback Linearization Controller and Direct Adaptive Feedback Linearization Controller", *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 31, no. 2, pp. 67-90, 2020. (In Persian) https://doi.org/10.22067/fum-mech.v31i2.84510

[18] H. Kalani, and A. Akbarzadeh, "Application of Reinforcement Learning for Navigation of a Planar Snake Robot in Serpentine Locomotion", *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 26, no. 1, pp. 97-118, 2015. (In Persian) https://doi.org/10.22067/fum-mech.v26i1.20871

[19] A. Khorshidi, and H. Moeenfard, "Beyond Pull-in Stabilization of a 2-DOF Torsional Micro-Actuator using a Fuzzy Controller", *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 27, no. 2, pp. 99-112, 2016. (In Persian) https://doi.org/10.22067/fum_mech.v27i2.40523

[20] H. Zarabadipour, and M. Farhangranj, “Robust-Adaptive Sliding Mode Controller Design with Fault tolerance for Active Suspension of Half-car model”, *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 34, no. 3, pp. 79-96, 2022. (In Persian) https://doi.org/10.22067/jacsm.2022.71589.1043

[21] Y. Wu, H. Fang, T. Xu, and F. Wan, “Adaptive Neural Fixed-time Sliding Mode Control of Uncertain Robotic Manipulators with Input Saturation and Prescribed Constraints”, *Neural Processing Letters*, vol. 54, pp. 3829-3849, 2022. https://doi.org/10.1007/s11063-022-10788-8

[22] M. Mokhtari, M. Taghizadeh, and M. Mazare, “Optimal adaptive super twisting sliding mode control base on zero moment point stability criterion of a lower limb exoskeleton”, *Amir Kabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 50, no. 4, pp. 525-532, 2020. (In Persian) https://doi.org/10.22060/mej.2019.16292.6321

[23] M. Mokhtari, M. Taghizadeh, M. Mazare, “Impedance Control Based on Optimal Adaptive High Order Super Twisting Sliding Mode for a 7-DOF Lower Limb Exoskeleton”, *Meccanica*, vol. 56, pp. 538-548, 2021. https://doi.org/10.1007/s11012-021-01308-4

[24] M. Mokhtari, M. Taghizadeh, and M. Mazare, “Active fault tolerant control based on adaptive back-stepping nonsingular fast integral terminal sliding mode approach”, *Amir Kabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 53, no. 6, pp. 3763-3782, 2021. (In Persian) https://doi.org/10.22060/mej.2021.18277.6789

[25] L. Qiao, and W. Zhang, “Adaptive second-order fast nonsingular terminal sliding mode tracking control for fully actuated autonomous underwater vehicles”, *IEEE*, vol. 44, no. 2, pp. 363–385, 2019. https://doi.org/10.1109/JOE.2018.2809018

[26] Q. Hu, L. Xi, and Ch. Wang, “Adaptive fault-tolerant attitude tracking control for spacecraft with time-varying inertia uncertainties”, *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 32, no. 3, pp. 674–687, 2019. https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.12.015

[27] J. Ma, S. S. Ge, and Z. Zheng, "Adaptive NN control of a class of nonlinear systems with asymmetric saturation actuators". *IEEE Trans Neural Network Learn System*, vol. 26, no. 7, pp. 1532–1538, 2015. https://doi.org/10.1109/TNNLS.2014.2344019

[28] G. Zhu, and J. Du, “Robust adaptive neural practical fixed-time tracking control for uncertain Euler-Lagrange systems under input saturations”, *Neurocomputing*, vol. 412, pp. 502–513, 2020. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.05.057

[29] F. Jalili, M. Malek- Jafarian, and A. Safavinejad, “Introduction of Harmony Search Algorithm for Aerodynamic Shape Optimization Using the Navier-Stokes Equations”, *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 2, no. 2, pp. 81-96, 2013. (In Persian)

[30] M. T. Hagan, and M. B. Menhaj, “Training feedforward networks with the Marquardt algorithm”, *IEEE Trans Neural Netw*, vol. 5, no. 6, pp. 989-993, 1994. *https://doi.org/10.1109/72.329697*

[31] S. Jin, J. Kim, J. Kim, and T. Seo, “Six-Degree-of-Freedom hovering control of an underwater robotic platform with four tilting thrusters via selective switching control”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 5, pp. 2370–2378, 2015.

[32] J. J. Craig, "Introduction to Robotics: Mechanics and Control, Upper Saddle River," *Pearson/Prentice Hall*, 2005. https:// doi.org/10.1109/JRA.1987.1087086

[33] M. Chen, G. Tao, and B. Jiang, "Dynamic surface control using neural networks for a class of uncertain nonlinear systems with input saturation", *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 26, no. 9, pp. 2086–2097, 2015. https://doi.org/10.1109/TNNLS.2014.2360933

[34] Z. Zuo, B. Tian, M. Defoort, and Zh. Ding, "Fixed-time consensus tracking for multi-agent systems with high-order integrator dynamics", *IEEE Trans. Autom Control*, vol. 63, no. 2, pp. 563–570, 2018. https://doi.org/10.1109/TAC.2017.2729502

[35] Z. Zheng, M. Feroskhan, and L. Sun, "Adaptive fixed-time trajectory tracking control of a stratospheric airship", *ISA Transacion*, vol. 76, pp. 134-144, 2018. https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.03.016

[36] M. Mokhtari, M. Taghizadeh, and M. Mazare, "Robust and Adaptive Control of an Exoskeleton Robot for Tracking Modified Desired Trajectory Based on Zero Moment Point Stability Theory", *Amir Kabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 53, no. 12, pp. 5831-5850, 2022. (In Persian) https://doi.org/10.22060/mej.2021.19761.7106